

Streszczenie pracy doktorskiej

Śledzenie ruchów głowy w środowisku symulatora lotu przy użyciu mechanizmu SLAM gogli rzeczywistości rozszerzonej

Onyeka Josephine Nwobodo

Promotor: dr hab., inż. Krzysztof A. Cyran, prof. PŚ

wrzesień 2025

Rosnąca złożoność współczesnego lotnictwa wymaga ciągłego rozwoju technologii szkolenia pilotów. Niniejsza rozprawa dotyczy istotnej luki w symulacji lotu poprzez opracowanie i walidację innowacyjnego systemu śledzenia głowy opartego na rzeczywistości rozszerzonej (AR), który wykorzystuje technologię jednoczesnej lokalizacji i mapowania (SLAM) zintegrowaną z adaptacyjną fuzją filtrów Kalmana i cząsteczkowych. Poprzez zwiększenie wierności, responsywności i realizmu symulatorów lotu AR, badania te wnoszą przełomowy wkład w rozwój przemysłu lotniczego, prowadząc do poprawy szkolenia pilotów, zwiększenia bezpieczeństwa operacyjnego i lepszego przygotowania do rzeczywistych scenariuszy.

Motywacją do podjęcia tych badań była pilna potrzeba przezwyciężenia ograniczeń istniejących symulatorów lotu, które często charakteryzują się niedokładnością śledzenia, opóźnieniami i niewystarczającą zdolnością adaptacji do dynamicznych warunków panujących w kokpicie. Symulatory lotu są niezbędne w szkoleniu pilotów, umożliwiając ćwiczenie złożonych manewrów, scenariuszy awaryjnych i różnych warunków lotu w bezpiecznym, kontrolowanym środowisku. Jednak skuteczność tych symulatorów w dużym stopniu zależy od dokładności i responsywności systemów śledzenia głowy, które sterują interfejsami AR. Obecne technologie śledzenia głowy, w tym systemy oparte na markerach i czujniki inercyjne, często napotykają takie wyzwania, jak dryf, zasłanianie i zakłócenia otoczenia. Ograniczenia te mogą prowadzić do niedopasowania elementów wirtualnych i fizycznych, co ostatecznie zakłóca wrażenia immersyjne i zmniejsza skuteczność szkolenia. Takie ograniczenia osłabiają jakość immersyjną symulacji AR, utrudniając pilotom pełne zaangażowanie się w długotrwałe, realistyczne ćwiczenia szkoleniowe. W niniejszej pracy podjęto bezpośrednio te wyzwania, proponując nowatorskie podejście oparte na technologii SLAM, dostosowane do specyficznych wymagań środowisk symulacji lotu. Technologia SLAM umożliwia mapowanie kokpitu w czasie rzeczywistym, dynamicznie dostosowując się do ruchów głowy i zmian otoczenia, zapewniając stałą zgodność nakładek wirtualnych

z fizycznymi elementami kokpitu. Ta dynamiczna rekaliibracja poprawia świadomość sytuacyjną pilota, umożliwiając płynne przejście między środowiskiem symulowanym a rzeczywistym.

Kompleksowy przegląd literatury podkreśla niedoskonałości istniejących metod śledzenia opartych na markerach i IMU, tworząc podstawę do integracji technologii SLAM. W ramach niniejszych badań dokonano rygorystycznej oceny różnych algorytmów SLAM, w tym ORB-SLAM, RGB-D SLAM i Visual-Inertial SLAM (VINS). Wybór i udoskonalenie tych algorytmów odgrywa kluczową rolę w zwiększeniu niezawodności i dokładności symulatorów lotu opartych na AR. Integracja SLAM zmniejsza opóźnienia i znacznie poprawia precyzję śledzenia, eliminując podstawowe ograniczenia istniejących systemów. Równoległe niniejsza rozprawa zawiera szczegółowe porównanie śledzenia opartego na markerach i śledzenia opartego na SLAM dla symulatorów lotu. Chociaż śledzenie oparte na markerach jest opłacalne i proste, często boryka się z problemami zasłaniania i dryftu, szczególnie w złożonych środowiskach o wielu kątach widzenia, takich jak kokpity samolotów. Śledzenie oparte na SLAM oferuje natomiast doskonałą adaptowalność dzięki ciągłej aktualizacji mapy przestrzennej otoczenia. W niniejszym badaniu oceniono wydajność obu podejść w różnych scenariuszach lotu, wykazując, że śledzenie oparte na SLAM konsekwentnie przewyższa metody oparte na markerach pod względem adaptowalności, szybkości reakcji i ogólnego poziomu immersji. Analiza porównawcza podkreśla potencjał SLAM do zrewolucjonizowania szkolenia pilotów, umożliwiając bardziej realistyczne i nieprzerwane doświadczenia AR.

Uzupełniając wierność przestrzenną, w ramach badań opracowano również warstwę identyfikacji opartą na uczeniu maszynowym, która w sposób ciągły i niejawnie rozpoznaje osobę szkoloną i jej bieżące zadanie na podstawie rutynowej interakcji AR. Wielomodalna, wielogłębiowa sieć LSTM łączy zsynchronizowane w czasie strumienie spojrzeń, ruchów głowy i gestów rąk w celu uzyskania stabilnych danych biometrycznych dotyczących zachowania, które służą do ciągłego uwierzytelniania i rozpoznawania zadań na urządzeniu. Warstwa ta zastępuje uciążliwe logowanie za pomocą klawiatury/kodu PIN na wspólnych zestawach słuchawkowych, wzmacnia prywatność i kontrolę dostępu oraz umożliwia personalizację zależną od zadania, dzięki czemu nakładki, listy kontrolne i oceny są powiązane z właściwym użytkownikiem i dostosowywane w czasie rzeczywistym bez przerywania szkolenia.

Rozszerzając adaptacyjność poza identyfikację, rozprawa wnosi lekki framework głębokiego uczenia się, który przewiduje stan retencji pamięci przy użyciu nieinwazyjnych sygnałów behawioralnych przechwyconych przez HoloLens 2: czas trwania spojrzenia, liczbę interakcji, liczbę ponownych odwiedzin i stabilność ruchów głowy, wzbogacony o osadzenia kategorii treści. Poprzez wnioskowanie o stanach, takich jak silne przypominanie sobie lub przeciążenie poznawcze, ramy te wspierają tempo w czasie rzeczywistym, ukierunkowane powtarzanie i wsparcie w postaci wskazówek, zamykając w ten sposób pętlę między sposobem interakcji uczestników szkolenia a tym, co zapamiętują, oraz przyczyniając się do osiągnięcia celu, jakim jest skuteczne szkolenie przy niewielkim obciążeniu.

Ramy metodologiczne tych badań obejmują rozbudowane konfiguracje eksperymentalne i analizy porównawcze różnych podejść do filtrowania, w tym rozszerzonego filtra Kalmana (EKF), filtra Kalmana bez zapachu (UKF), filtra Kalmana zespołowego (EnKF) oraz filtrów cząsteczkowych sekwencyjnego ponownego próbkowania ważności (SIR). Wykazano, że innowacyjne połączenie filtrów Kalmana i cząsteczkowych wykorzystuje komplementarne zalety obu podejść, rozwiązując problem nieliniowej dynamiki charakterystycznej dla śledzenia głowy w rzeczywistości rozszerzonej podczas symulacji lotu. To hybrydowe podejście zwiększa ogólną odporność i dokładność systemu śledzenia, zapewniając doskonałą stabilność podczas ćwiczeń symulacji lotu. Walidacje eksperymentalne wykazują, że ta adaptacyjna metoda połączenia konsekwentnie zmniejsza błąd średniokwadratowy (RMSE) we wszystkich wskaźnikach śledzenia przestrzennego, co skutkuje znacznym wzrostem stabilności i precyzji.

Ponadto badania analizują wpływ tych postępów technologicznych na skuteczność szkolenia pilotów. Jednym z najważniejszych wniosków jest zmniejszenie opóźnień i choroby lokomocyjnej doświadczanej podczas długich sesji symulacyjnych. Tradycyjne symulatory lotu, które w dużym stopniu opierają się na śledzeniu opartym na markerach, często cierpią z powodu opóźnionych reakcji, które mogą wywoływać chorobę lokomocyjną u pilotów. Udoskonalona precyzja śledzenia umożliwiona przez SLAM minimalizuje dysonans poznawczy, pozwalając pilotom pozostawać w immersyjnym środowisku szkoleniowym przez dłuższy czas bez dyskomfortu. To przełomowe osiągnięcie poprawia wyniki szkolenia i sprzyja opłacalnemu skalowaniu symulatorów lotu opartych na AR w celu ich powszechnego zastosowania w lotnictwie komercyjnym i wojskowym.

Praca wnosi również nowatorskie dostosowanie prawa Fittsa do środowisk AR, oferując teoretyczne ramy oceny interakcji użytkowników w przestrzeni trójwymiarowej. Dzięki włączeniu ruchów głowy i orientacji przestrzennej do modeli predykcyjnych, adaptacja ta zmniejsza trudność zadań interakcyjnych o około 40%, optymalizując w ten sposób projekty interfejsów AR w celu poprawy komfortu użytkownika. Ta wiedza toruje drogę do bardziej intuicyjnych interfejsów kokpitu i ergonomicznych układów systemów AR, dodatkowo wzmacniając wartość symulatora w kompleksowych programach szkolenia pilotów.

Poza lotnictwem, możliwość przenoszenia platformy ilustruje moduł edukacyjny AR Mach-Zehnder Interferometer, który stosuje te same zasady projektowania przestrzennego, uwzględniającego tożsamość i dostosowującego się do zdolności poznawczych, do treści STEM o dużej gęstości pojęciowej. Moduł przekształca abstrakcyjne konstrukcje optyki kwantowej w oparte na SLAM, manipulowalne reprezentacje elementów optycznych i ścieżek wiązki oraz łączy kierowaną eksplorację z rekonstrukcją w celu utworzenia szkieletu schematu, ustanawiając szablon wielokrotnego użytku do przekładania abstrakcyjnej wiedzy technicznej na interakcję sytuacyjną, kierowaną zadaniami.

Rozprawa ta stanowi przełomowy postęp w symulacji lotu AR, rozwiązując podstawowe problemy związane ze śledzeniem głowy, mapowaniem przestrzennym i interakcją w czasie rzeczywistym. Adaptacyjna metoda fuzji filtrów Kalmana i cząsteczkowych, w

połączeniu ze śledzeniem opartym na SLAM, ustanawia nowe standardy wydajności dla systemów AR w lotnictwie. Badania te stanowią podstawę dla przyszłego rozwoju AR w symulacji lotów. Rozszerzają one swoje zastosowanie na inne dziedziny wymagające wysokiej dokładności śledzenia przestrzennego, takie jak pilotowanie bezzałogowych statków powietrznych (UAV) i zarządzanie ruchem lotniczym. Łącząc technologiczną przepaść między symulowanym a rzeczywistym środowiskiem lotniczym, niniejsza rozprawa podkreśla transformacyjny potencjał AR w lotnictwie, zapoczątkowując nową erę immersyjnych, responsywnych i skutecznych rozwiązań w zakresie szkolenia pilotów.